

금형강의 동적 및 정적 재결정 거동과 미세조직 변화 예측에 관한 연구

정호승* · 조종래** · 차도진*** · 배원병****

A Study on Dynamic and Static Recrystallization Behaviors and Microstructure Evolution Prediction of Die Steels

H. S. Jeong, J. R. Cho, D. J. Cha and Y. B. Bae

Abstract

Evaluation of microstructural changes during open die forging of heavy ingots is important for process control. The objective of the control of forging parameters, such as shape of the dies, reduction, temperature and sequence of passes, is to maximize the forging effects and to minimize inhomogeneities of mechanical properties. The hot working die steel is produced by using the multistage open die forging. The structure is altered during forging by subsequent processes of plastic deformation, recrystallization and grain growth. A numerical analysis using an rigid visco-plastic finite element model was performed to predict microstructural evolution of hot working die steel.

Key Words : Dyanmic Recrystallization, Static Recrystallization, Grain Growth, Mean Grain Size, Finite Element Method, Microstructural Evolution

1. 서 론

대형 기계 제품의 소재로 사용되는 금형강은 주조(casting)에 의해 제조된 대형 강괴(ingot)를 자유 단조(open die forging) 작업을 통해서 만들어진다. 열간 가공에서는 변형률 속도($\dot{\epsilon}$), 온도(T), 변형률(ϵ)에 의해 변형하는 동안 가공경화, 동적 회복, 동적 재결정이 일어나고, 각각의 초기 변형량과 단조 공정간의 소요시간과 온도 변화에 의해 정적, 준동적 재결정, 입자 성장이 일

어난다. 그러나 공정 변수들이 적절히 사용되지 못하면 조직이 불균일하게 되므로 이러한 공정 변수들의 최적 제어에 의해 균질하고 미세한 조직(structure)을 얻으며 기계적 특성을 향상시키고 공정 시간을 단축시킬 수 있다.

지금까지 많은 연구자들이 고온 변형시 여러 소재들의 변형거동을 연구하였고 미세 조직의 정적 재결정, 동적 재결정, 입자 성장을 수학적 모델링을 하였으며,⁽¹⁻⁵⁾ 또한 고온 변형시 여러 변수를 이용하여 유동응력을 예측하기 위한 기법이 제안되었으며 수학적 모델링을 수치

* 한국해양대학교 대학원 기계공학과
** 한국해양대학교 공과대학 기계정보공학부
*** 부산대학교 대학원 정밀기계공학과
**** 부산대학교 공과대학 기계공학부

Table 1 Chemical composition of die steel

Element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Al
Composition(wt%)	0.36	0.26	1.10	0.006	0.003	0.07	1.21	0.26	0.027	0.025

해석적 방법인 유한요소법을 적용하여 미세 조직의 변화를 예측하는 시뮬레이션을 수행하기도 하였다.

본 논문은 기초실험으로부터 동적 재결정 입자크기, 재결정 분율, 고온 유동응력과 정적 및 준동적 재결정 완료 후 입자성장을 수학적 모델을 제시하여 이것을 수치해석적 방법인 강소성 유한요소법에 적용하였고, 타당성을 검증하기 위해 실험과 시뮬레이션을 수행하여 미세 조직 변화 및 다이 하중을 비교하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 금형강의 성분은 table 1에 나타내었고 시편은 직경 8mm, 높이 12mm인 원통형이다.

2.1 동적 재결정 실험

5°C/sec의 속도로 목표온도까지 상승시키고 3분간 유지시킨 후 0.01/s, 0.1/s, 1.0/s의 변형률 속도와 950°C, 1050°C, 1150°C의 목표온도와 35%, 50%의 압축에 의한 실험 조건에 따라 등온 압축을 실행하였다.

2.2 입자 성장 실험

0.01/s, 1.0/s의 변형률 속도와 950°C, 1150°C의 목표온도와 10%, 20%, 30%의 압축에 의한 실험 조건에 따라 등온압축을 실행하고 압축 완료 후 하중을 제거하고, 입자 성장에 따른 입자 크기의 변화를 관찰하기 위해 변형률 속도 0.01/s에서는 5sec, 10sec, 100sec, 600sec와 변형률 속도 1.0/s에서는 5sec, 20sec, 100sec, 600sec동안 목표온도로 등온유지 한 후 질소 가스로 급냉을 하였다.

2.3 등속 압축 실험

실험 조건은 950°C, 1150°C의 목표온도와 1mm/s의 등속으로 16.7% 등온압축을 실행하고, 하중을 제거한 다음 각각 100sec, 600sec의 유지 시간동안 유지한 후 다시 20% 등온 압축을 실행한 후 급냉하였다.

2단 등속 압축 실험으로 인해 다양한 변형률 속도와 변형률에서 동적, 정적, 준동 재결정과 입자 성장을 발생시켜서 실험과 시뮬레이션 결과를 비교하기 위함이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 고온 유동 곡선

고온 유동 곡선에서 공정변수인 변형률, 온도, 변형률 속도, 활성화에너지(Q)는 유동 응력 곡선을 표현하는데 사용되고, 활성화에너지는 Zener-Hollomon 파라미터와 Arrhenius형태인 하이퍼볼릭 사인 법칙의 방정식으로부터 구할 수 있다.

$$Z = \dot{\epsilon} \cdot \exp(Q/RT) \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon} = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \cdot \exp(-Q/RT) \quad (2)$$

실험 데이터로부터 식 (1),(2)을 이용하여 활성화에너지를 구하였다. 여기서 $n=4.05$, $Q=330.4(\text{kJ/mol})$, $\alpha=0.012 (\text{MPa}^{-1})$, $R=8.314(\text{J/mol} \cdot \text{K})$ 이다.

열간 변형시 발생하는 가공경화와 회복, 동적 재결정의 현상을 고려하여 유동 응력 곡선을 식 (3)과 같이 모델링하였다.⁽⁵⁾

$$\sigma = \sigma_p [1 - \exp(-C\epsilon)]^m - (\sigma_p - \sigma_s) [1 - \exp(-k(\frac{\epsilon - \alpha\epsilon_p}{\epsilon_p})^{m'})] \quad (3)$$

모델링된 하나의 고온 유동 곡선과 실제 실험에서 구한 데이터를 비교하여 Fig. 1에 도시하였으며, 매우 근사한 결과를 얻을 수 있었다.

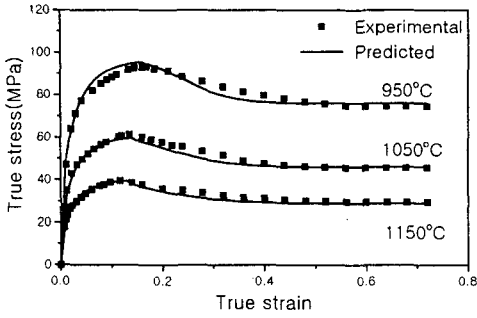
실험에 의해 동적 재결정 분율(X_{dyn})과 동적 재결정 크기(d_{rex})를 미세조직 관찰하여 식을 구하였다. Fig. 3은 동적 재결정 실험에서의 미세조직 사진이다.

$$X_{dyn} = [1 - \exp(-k(\frac{\epsilon - \epsilon_c}{\epsilon_c})^{m'})] \quad (4)$$

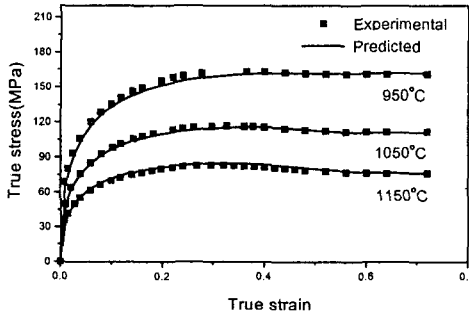
$$k = 0.654 + 0.146 \log(Z/A)$$

$$m' = 1.4737 - 0.1107 \log(Z/A)$$

$$d_{rex} = 1.2 \times 10^4 Z^{-0.21} \quad (5)$$



(a) $\dot{\epsilon} = 0.01/s$



(b) $\dot{\epsilon} = 1.0/s$

Fig. 1 Flow curves, experimental and predicted in various strain rate

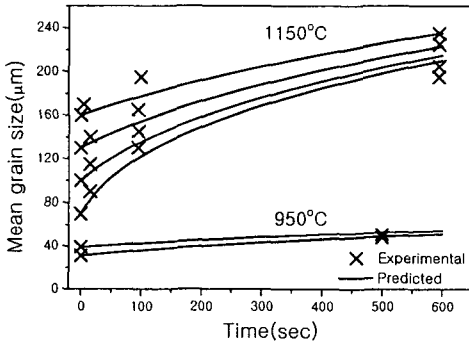
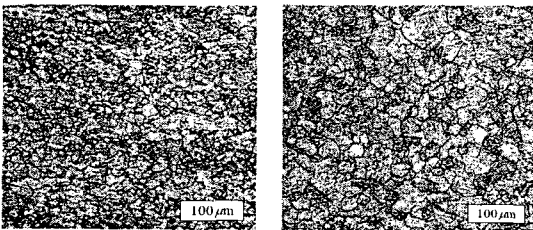


Fig. 2 Grain growth curve, experimental and predicted for 950°C, 1150°C



(a) 1050°C

(b) 1150°C

Fig. 3 Microstructure of 50% compressed at $\dot{\epsilon} = 1.0/s$

3.2 정적 및 준동적 재결정

Sellars⁽²⁴⁾는 C-Mn 강에 있어서 정적 재결정 분율을 아래와 같이 표현하였고, 정적 및 준동적 재결정 발생을 표현하기 위해 시뮬레이션에 적용하였다.

$$X = 1 - \exp\left[-\ln 2 \left(\frac{t}{t_{0.5}}\right)^2\right] \quad (6)$$

$$t_{0.5} = 2.5 \cdot 10^{-19} d_{ini}^2 \dot{\epsilon}^{-4} \exp(300000/RT), \quad (\epsilon \leq 0.8\epsilon_p)$$

$$t_{0.5} = 1.06 \cdot 10^{-5} Z^{-0.6} \exp(300000/RT), \quad (\epsilon \geq 0.8\epsilon_p)$$

X는 정적 재결정 분율을 나타내고, $t_{0.5}$ 는 50% 재결정이 일어나는데 걸리는 시간이다.

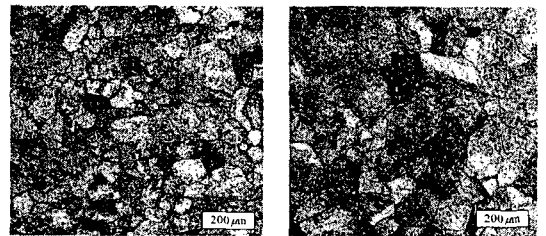
3.3 입자 성장

고온변형 후 잔류 변형률에 의해서 정적 및 준동적 재결정이 발생하고 완료 후 입자가 성장한다. 입자 성장은 식 (7)과 같이 유도하였고 Fig. 2은 입자 성장식과 실험에서 구한 데이터를 비교하여 도시하였다. Fig. 4는 입자 성장 실험의 미세조직 사진이다.

$$\bar{D}^3 = D_0^3 + 1.8 \cdot 10^{16} t \exp(-Q/RT) \quad (7)$$

3.4 시뮬레이션

하나의 요소에 대해서 재결정이 일어나는 부분을 부영역(X_j)으로 하면 다음 스텝에서의 동적 재결정 분율은 $X_i = (1 - X_j) \times X_{dyn}$ 으로 재정의한다. 각 스텝에서의 분율은 $(X_j = \sum X_i)$ 영역과 $(1 - \sum X_i)$ 영역으로 나누고 다시 변형률을 계산한다.



(a) 20sec holding

(b) 600sec holding

Fig. 4 Microstructure of 20% compressed at 1150°C, $\dot{\epsilon} = 1.0/s$

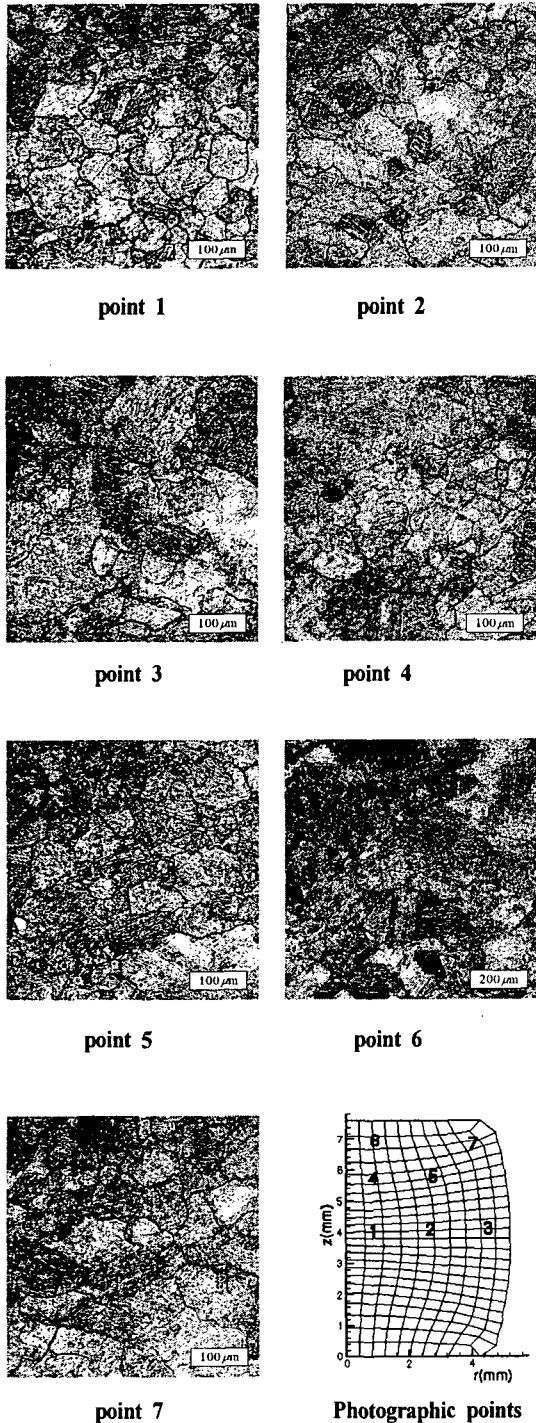
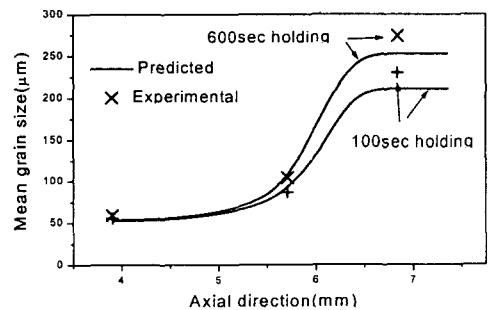
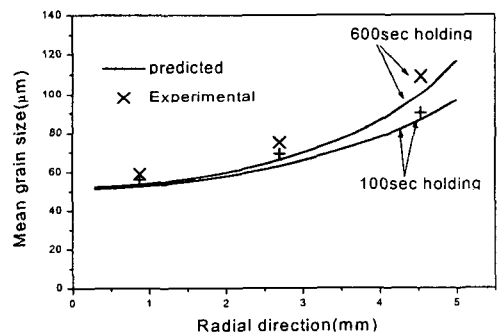


Fig 5 Microstructure of interrupted double compression at $v=1\text{mm/s}$, $1150\text{ }^\circ\text{C}$ and 600s holding

등온·등속 압축실험에 의한 조직사진은 Fig. 5에 나타내었다. 중심부에서는 재결정이 많이 관찰되었고 중심에서 반경방향과 축방향의 바깥으로 갈수록 재결정이 적게 나타났다. 축방향의 바깥부분은 다이와의 마찰에 의해 변형이 많이 되지 않았고, 그 밑부분에서는 입자 성장만이 보였고, 반경 방향의 바깥부분에서는 변형률이 적어 재결정이 적게 발생하였다. 유지시간이 길어질수록 입자 성장이 많이 일어나서 평균 입자 크기도 커졌다. 동적 재결정이 변형을 구동력으로 해서 발생하는 현상이기 때문에 변형이 심할수록 재결정분율이 커진다는 것을 보여주고 있고 동적, 정적 임계 변형률에 못 미치게 변형을 받은 곳은 입자 성장만을 보였다. Fig. 6은 실험과 시뮬레이션 결과를 축방향과 반경방향으로의 평균 입자 크기를 도시하였고 Fig. 7은 전체 공정에서 시뮬레이션한 결과를 평균 입자 크기의 분포로 도시하였다. Fig. 8는 최종 공정의 입자 크기 변화를 시뮬레이션 결과로써 도시하였고 Fig. 9은 시뮬레이션과 실험 결과의 하중을 도시하였다.



(a) Axial direction



(b) Radial direction

Fig. 6 Comparison of grain size between experimental and predicted results after interrupted double compression

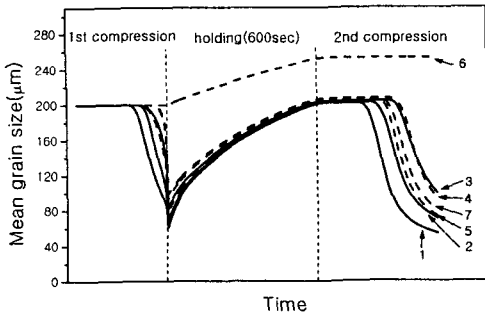


Fig. 7 Mean grain size from predicted result at each position for processing

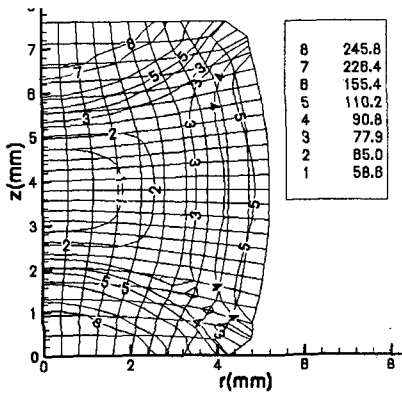


Fig. 8 Distribution of mean grain size of final process at $v=1\text{mm/s}$, 1150°C

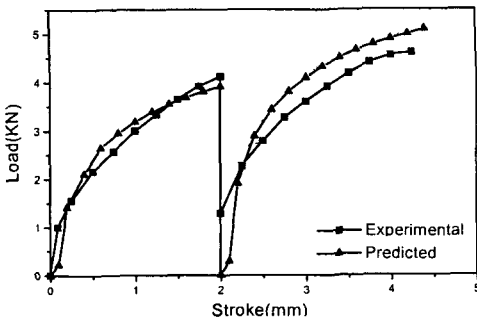


Fig. 9 Comparison of experimental and predicted load, $v=1\text{mm/s}$, 1150°C

4. 결론

금형강의 열간 압축실험을 통해서 동적, 정적 재결정과 입자 성장을 관찰하여 수학적 모델링을 하였다. 수학적 모델링을 이용하여 고온 변형시 미세조직 변화를 시뮬레이션하고 결과를 실험에서 얻은 값과 비교하였으며 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 금형강의 고온 유동곡선, 동적 재결정과 입자 성장의 입자 크기 변화를 공정 변수들에 의하여 수학적 모델링으로 표현하였고 실험 결과와 잘 일치하였다.

(2) 고온 변형에서는 임계 변형률을 지나 변형이 많을수록 재결정이 많이 발생함을 관찰하였고 동적 재결정된 입자 크기는 Zener-Hollomon 파라미터가 작을수록, 즉 온도가 높고 변형률 속도가 낮을수록 증가하였다.

(3) 유지 시간동안 입자 성장에 의한 입자 크기는 Zener-Hollomon 파라미터가 작을수록, 즉 온도가 높고 변형률이 낮을수록 증가하였다.

(4) 수치 해석적인 방법으로 미세조직 예측을 위해 강소성 유한요소법을 이용하였고 다단 등속 압축 실험에 의한 결과와 잘 일치하였으며, 그 결과는 본 논문에서 제안한 수학적 모델을 적용한 새로운 프로그램을 개발하여 타당성을 확인하였다.

후기

2000년도 두뇌한국21 사업에 의하여 지원되었음

참고 문헌

- (1) C. M. Sellars, 1979, "The physical metallurgy of hot working", International Conference on Hot Working and Forming Process, University of Sheffield, pp. 3~47.
- (2) C. M. Sellars and J. A. Whiteman, 1979, "Recrystallization and grain growth in hot rolling", Metal Science, Vol. 13, pp. 187~194.
- (3) C. M. Sellars, 1990, "Modelling microstructural development during hot rolling", Materials Science and Technology, Vol. 6, pp. 1072~1081.
- (4) John H. Beynon and C. Michael Sellars, 1992, "Modelling microstructure and its effects during multipass hot rolling", ISIJ International, Vol. 32, No. 3, pp. 359~367.
- (5) S. F. Medina and C. A. Hernandez, 1996, "General expression of the Zener-Hollomon parameter as a function of the chemical composition of low alloy and microalloyed steels", Acta Mater, Vol. 44, No. 1, pp. 137~148.